

PENGARUH GRID PEJARAK DAN NOZZLE TERHADAP PARAMETER TERMOHIDROLIKA PERANGKAT BAHAN BAKAR REAKTOR AP1000

Muh. Darwis Isnaini
Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir (PTRKN) BATAN
Email : darwis@batan.go.id

Diterima editor 9 September 2013
Disetujui untuk publikasi 2 Oktober 2013

ABSTRAK

PENGARUH GRID PEJARAK DAN NOZZLE TERHADAP PARAMETER TERMOHIDROLIKA PERANGKAT BAHAN BAKAR REAKTOR AP1000. Grid pejarak berfungsi secara mekanik untuk menambah kekuatan perangkat bahan bakar nuklir (BBN) dari getaran yang ditimbulkan oleh aliran pendingin yang mengalir melalui celah subkanal di dalam perangkat BBN. Oleh sebab itu perlu dilakukan analisis termohidrolika reaktor AP1000 pada kondisi tunak untuk mengetahui pengaruh pemasangan grid pejarak pada perangkat BBN. Metodologi yang dilakukan melakukan perhitungan penurunan tekanan teras, fluks massa dan koefisien hantaran kalor pada perangkat BBN tanpa grid pejarak dan variasi jumlah grid. Pada analisis subkanal terpanas (SKP) ditekankan pada perbandingan termohidrolika reaktor AP1000 pada kondisi tunak antara SKP tanpa grid pejarak dan SKP dengan 8/2 grid-nozzle, dengan menggunakan kode COBRA-EN. Dibandingkan SKP tanpa grid pejarak, maka pemasangan 8/2 grid-nozzle menyebabkan penurunan tekanan teras meningkat 3,74 kali lipat dari 73,99 kPa menjadi 276,88 kPa, fluks massa pendingin dan koefisien hantaran kalor berfluktuasi pada daerah sekitar grid pejarak, menghasilkan proses pengambilan panas oleh pendingin menjadi lebih efektif. Penurunan tekanan yang semakin besar juga akan berakibat pada nilai fluks kalor kritis (CHF) bertambah besar. Karena daya reaktor tidak berubah, maka fluks kalor cenderung berubah kecuali pada daerah grid, oleh sebab itu nilai DNBR menjadi bertambah besar yang berarti margin keselamatannya juga bertambah besar. Perhitungan untuk SKP dengan 8/2 grid-nozzle dibandingkan dengan desain diperoleh hasil penurunan tekanan teras sebesar 276,88 kPa (perbedaan 0,68%), temperatur outlet pendingin sebesar 325,54°C (perbedaan 0,21%), fluks kalor maksimum sebesar 1635,16 kW/m² (perbedaan 0,03%) dan MDNBR sebesar 2,48 (lebih besar 14,06% dari batas minimum korelasi W-3). Penambahan 8/2 grid-nozzle memberikan angka keselamatan yang lebih tinggi.

Kata kunci: Pengaruh grid pejarak dan nozzle, analisis termohidrolika, AP1000, COBRA-EN.

ABSTRACT

THE INFLUENCE OF NOZZLE AND SPACER GRIDS AGAINST THERMAL-HYDRAULICS PARAMETERS OF AP1000 REACTOR FUEL ASSEMBLIES. One of the spacer grids function was to increase the mechanical strength of fuel assembly from vibration caused by the coolant flow through the subchannels in the fuel assemblies. Therefore, thermal-hydraulics analysis of AP1000 reactor on steady state condition must be carried out to determine the effect of installing the spacer grids in the fuel assemblies. The methodology were making the calculation such as core pressure drops, mass flux and heat transfer coefficient for fuel assemblies without spacer grids and with variation number of spacer grids. The hottest subchannel analysis was focused on the comparative of thermal-hydraulic of AP1000 reactor on the steady state condition between the hottest subchannel without spacer grids and the hottest subchannel with 8/2 grid-nozzle using COBRA-EN code. Compared to the hottest subchannel without spacer grids, the installing 8/2 grid-nozzles on subchannels affected the core pressure drops increased 3.74 times from 73.99 kPa to 276.88 kPa, the coolant mass flux decreased and the heat transfer coefficient fluctuated in the grid spacer region, having an affect on heat transfer process by collant would be more effective. The greater pressure drop would have an affect on increasing the critical heat flux (CHF). Because of the reactor power didn't change, the heat flux didn't prone to change, except near the grid spacer region, so the DNBR would increased, its mean that the safety margin would be better. The calculation for the hottest subchannel with 8/2 grid-nozzles compared to the design gave results the core pressure drop was 276.88 kPa (deviation of 0.68%), the coolant outlet temperature was 325.54°C (deviation of 0.21%), the maximum heat flux was 1635.16 kW/m² (deviation of 0,03%) and the MDNBR was 2.48 (14.06% greater than the W-3 correlation limit). Installing 8/2 grid-nozzles would gave higher safety margin.

Keywords: The influence of nozzle and spacer grid, thermal-hydraulic analysis, AP1000, COBRA-EN.

PENDAHULUAN

Setiap perangkat bahan bakar nuklir (BBN) AP1000 tersusun atas 264 batang bahan bakar (fuel rod), 24 tabung pengarah (*guide thimble*) dan 1 tabung berisi instrumentasi, yang mempunyai panjang aktif 4,267 m. Perangkat bahan bakar disangga pada beberapa interval sepanjang batang bahan bakar dengan grid untuk menjaga jarak antar batang bahan bakar secara lateral (ke arah samping) selama umur perangkat.

Terdapat dua jenis grid yang digunakan pada perangkat BBN AP1000. Jenis pertama disebut grid pengatur jarak atau grid pejarak (*spacer grid*) yang berbentuk lesung penyangga (*support dimples*), pegas (*springs*) dan sirip penyampur (*mixing vanes*) atau kombinasinya yang dirangkai dalam susunan berbentuk kerat, seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Grid pejarak dengan bentuk sirip penyampur digunakan pada perangkat BBN daerah fluks kalor tinggi untuk menaikkan campuran pendingin. Jenis yang kedua ditempatkan pada bagian bawah dan atas perangkat BBN, yang berfungsi untuk dudukan/pemegang perangkat BBN sehingga memudahkan selama proses penanganan pemuatan dan pengosongan (*loading and unloading*) bahan bakar ke dalam teras reaktor, dan untuk mengarahkan aliran pendingin masuk dari bawah teras ke perangkat BBN dan keluar lagi menuju atas teras, disebut *nozzle* bawah (*bottom nozzle*) dan *nozzle* atas (*top nozzle*) [1]. Pada perangkat BBN AP1000 terdapat 2 grid jenis kedua (*nozzle* bawah dan atas) yang terbuat dari stainless steel SS-304 dan 8 grid jenis pertama yang terbuat dari ZIRLO sesuai dengan bahan kelongsong bahan bakar.

Fungsi dari grid pejarak (*spacer-grid*) adalah (1) untuk menambah kekuatan mekanik perangkat BBN dari getaran (vibrasi) ke arah samping (*lateral*) dan vertikal, (2) mempertahankan jarak antar batang bahan bakar pada kondisi pemuatan operasi dan kecelakaan, (3) mendorong untuk terjadinya campuran aliran, dan (4) menjaga tabung pengarah tetap lurus sehingga tidak menghalangi insersi batang kendali baik pada kondisi normal maupun kecelakaan, atau secara ringkas grid pejarak berguna untuk menjaga keutuhan perangkat batang bahan bakar [2]. Keberadaan grid pejarak sedikit banyak akan mengurangi luasan aliran pendingin pada posisi grid pejarak, sehingga akan meningkatkan penurunan tekanan (*pressure drop*) sepanjang teras. Agar tidak mengganggu turbulensi aliran, maka pada grid pejarak dipasang sirip penyampur aliran (*flow mixing vane*). Akibat dari perubahan nilai penurunan tekanan teras, akan berakibat pada perubahan fluks panas kritis, sehingga rasio untuk terjadi awal pendidihan inti (*Departure of Nucleate Boiling Ratio – DNBR*) juga akan berubah. Untuk dapat mengetahui pengaruh adanya grid pejarak tersebut, maka diperlukan pemodelan dan perhitungan yang lebih rinci. Dengan latar belakang di atas, maka di dalam makalah ini, akan dibahas lebih jauh hasil penelitian tentang pengaruh grid pejarak perangkat BBN pada perhitungan parameter termohidrolika teras AP1000. Penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk mengevaluasi desain suatu pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN) terhadap pengaruh dipasangnya komponen grid pejarak dan grid dudukan/pemegang (*nozzle*) perangkat BBN AP1000 terhadap parameter termohidrolika seperti penurunan tekanan teras, temperatur pendingin, temperatur kelongsong bahan bakar, temperatur meat bahan bakar, fluks kalor kritis, DNBR minimum (MDNBR) dengan menggunakan kode COBRA-EN yang telah divalidasi dengan baik [3,4,5]. Dari perhitungan ini diharapkan diperoleh beberapa hasil yang merupakan bagian untuk memperbaiki dan melengkapi hasil evaluasi desain AP1000 sebelumnya.

Manfaat dari hasil penelitian adalah dapat memberikan analisis parameter termohidrolika khususnya pada dokumen kendali desain (*Design Control Document – DCD*) tentang analisis grid (*grid analyses*) sehingga dapat terunut dan tervalidasi dengan baik, serta memberikan sumbangan dalam litbang energi khususnya mengenai termohidrolika reaktor AP1000 di Indonesia.

DASAR TEORI

Penurunan Tekanan pada Grid Pejarak (*Spacer Grid*) dan *Nozzle*

Kehilangan tekanan sepanjang batang bahan bakar selain dipengaruhi oleh panjang batang bahan bakar, dapat juga ditimbulkan dengan adanya grid dudukan/pemegang yang berbentuk *nozzle* (*nozzle* bagian atas dan bawah) atau grid pejarak sarang lebah (*Honeycomb Grid Spacer*), seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Kehilangan tekanan dapat dihitung menggunakan koefisien kehilangan tekanan. Penurunan tekanan akibat adanya pejarak lebih besar dibandingkan dengan kehilangan tekanan sepanjang perangkat BBN telanjang (*bare-rod bundle*).

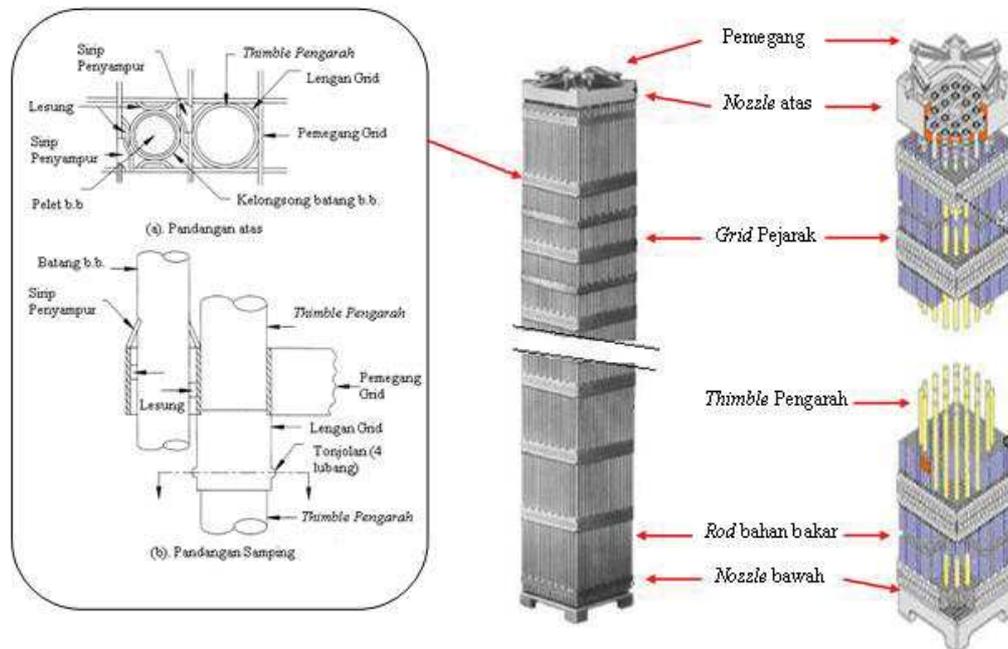
Penurunan tekanan (Δp_s) sepanjang pejarak diberikan oleh persamaan DeStordeur sebagai berikut [6]:

$$\Delta p_s = C_s (\rho V_s^2 / 2) (A_s / A_v) \quad (1)$$

dengan :

- C_s : koefisien penahan (*drag coefficient*)
- ρ : rapat jenis pendingin, kg/m^3
- A_v : luas aliran yang tak tertutup oleh grid atau pejarak, m^2
- A_s : luas proyeksi frontal dari pejarak, m^2
- V_s : kecepatan pendingin di bagian pejarak, m/s

Grid pejarak mempunyai ukuran tebal dan tinggi masing-masing 0,8 dan 40 mm [7]. Koefisien penahan grid (*grid drag coefficient*) merupakan fungsi bilangan Reynold untuk tipe pejarak kawat spiral dan pejarak grid sarang lebah, di mana pada nilai bilangan Reynold tinggi ($Re \approx 10^5$), nilai koefisien penahan (C_s) untuk pejarak grid sarang lebah sebesar $\approx 1,65$ [6], untuk pejarak grid bentuk lesung dengan sirip penyampur aliran sebesar 2,37 [8], sedangkan nilai koefisien penahan untuk *nozzle* bagian bawah dan atas masing-masing sebesar 3,29 dan 2,60 [8].



Gambar 1. Potongan perangkat BBN dilengkapi *nozzle* (bagian atas dan bawah) dan grid pejarak bentuk lesung dengan sirip penyampur aliran pada batang bahan bakar dan *thimble* pengarah. [1,2]

Korelasi Fluks Kalor Kritis (*Critical Heat Flux - CHF*)

Korelasi yang banyak digunakan untuk analisis awal terjadinya pendidihan (*Departure of Nucleate Boiling – DNB*) untuk reaktor PWR adalah korelasi W-3 yang dikembangkan oleh Tong [6]. Korelasi ini dapat dipergunakan untuk bentuk geometri tampang aliran lingkaran, persegi dan perangkat batang. Korelasi ini dikembangkan untuk fluks kalor aksial yang seragam, sedangkan untuk distribusi fluks yang tidak seragam ditambahkan faktor koreksi. Pengaruh pejarak lokal dapat juga diambil ke dalam perhitungan dengan faktor spesifik. Korelasi fluks kalor kritis untuk kanal yang dipanasi secara seragam diberikan oleh persamaan:

$$q''_{cr} = \{(2,022 - 0,06238p) + (0,1722 - 0,01427p) \exp[(18,177 - 0,5987p)x_e]\} \\ [(0,1484 - 1,596x_e + 0,1729x_e^2)2,326G + 3271][1,157 - 0,869x_e][0,2664 \\ + 0,8357 \exp(-124,1D_h)] [0,8258 + 0,0003413(h_f - h_{in})] \quad (2)$$

dengan :

- q''_{cr} : fluks kalor kritis atau fluks kalor DNB, kW/m²
- p : tekanan, MPa
- G : fluks massa, kg/m² s
- D_h : diameter terpanasi ekuivalen (*equivalent heated diameter*), m
- x_e : kualitas termodinamika uap lokal
- h_{in} : entalpi masukan (kJ/kg)
- h_f : entalpi pendingin saturasi (kJ/kg)

Korelasi pada persamaan (2) berlaku valid untuk daerah jangkauan:

- $p = 5,516$ sampai $15,86$ MPa
- $G = 1356,3$ sampai $6781,5$ kg/m².s
- $D_h = 0,00508$ sampai $0,01778$ m
- $x_e = -0,15$ sampai $0,15$
- $L = 0,254$ sampai $3,66$ m

Fluks kalor aksial yang tidak seragam ($q''_{cr,n}$) dapat dicari dari fluks kalor seragam dikalikan faktor koreksi F yang ditentukan dengan persamaan:

$$q''_{cr,n} = q''_{cr} / F \quad (3)$$

dengan :

$$F = \frac{C \int_0^{\ell} q''(z') \exp[-C(\ell - z')] dz'}{q''(\ell) [1 - \exp(-C\ell)]} \quad (4)$$

dan:

- $q''_{cr,n}$: fluks kalor lokal pada posisi DNB, kW/m²
- ℓ : jarak ke posisi DNB yang diprediksikan oleh model q''_{cr} yang seragam, dan

$$C = \frac{4,23 \times 10^6 [1 - x_e(\ell)]^{7,9}}{G^{1,72}} m^{-1} \quad (5)$$

Adapun rasio awal terjadinya pendidihan inti (*Departure of Nucleate Boiling Ratio – DNBR*) dinyatakan dalam bentuk perbandingan fluks kalor kritis dengan fluks kalor pada titik atau ketinggian bahan bakar (z).

$$DNBR = \frac{\text{Fluks kalor kritis } (z)}{\text{Fluks kalor } (z)} = \frac{q''_{cr}(z)}{q''(z)} \quad (6)$$

Dari beberapa literatur disebutkan bahwa untuk menjamin keselamatan operasi reaktor, maka dipersyaratkan memiliki DNBR minimum atau MDNBR dengan menggunakan korelasi W-3 adalah 1,30 [6] atau 2,17 [9,10], sedangkan *Westinghouse* mempersyaratkan MDNBR sebesar 2,80 dengan korelasi WRB-2M [1].

Kode COBRA-EN

Kode COBRA-EN adalah sebuah program komputer untuk menganalisis termohidrolika teras (berupa perangkat BBN) atau termohidrolika subkanal (berupa batang bahan bakar) baik untuk kondisi tunak (*steady state*) atau transien. Data masukan kode COBRA-EN adalah daya linier, ukuran geometri elemen bakar (bahan bakar dan kelongsong), laju alir efektif, temperatur pendingin masukan ke teras dan sifat termal elemen bakar (konduktivitas termal dan panas spesifik). Adapun keluaran dari perhitungan antara lain distribusi penurunan tekanan, entalpi, fluks massa, densitas pendingin, distribusi temperatur pendingin, kelongsong dan meat bahan bakar, fluks panas, besar hantaran kalor dan DNBR.

Penurunan tekanan (ΔP) sepanjang pejarak atau melalui grid plat bagian atas dan bawah di dalam kode COBRA-EN diberikan oleh persamaan:

$$\Delta P = K_D (G^2 v' / 2g_c) \quad (7)$$

dengan:

- ΔP : penurunan tekanan (kgf/m²)
- K_D : koefisien kehilangan tekanan oleh penahan (*drag coefficient*)
- G : fluks massa pendingin (kg/m²/s)
- v' : volume spesifik (m³/kg)
- g_c : faktor konversi dari teknis (kg.m/s²) ke satuan gaya (kgf) di mana $g_c = 9,80665$

Diskripsi teras AP1000

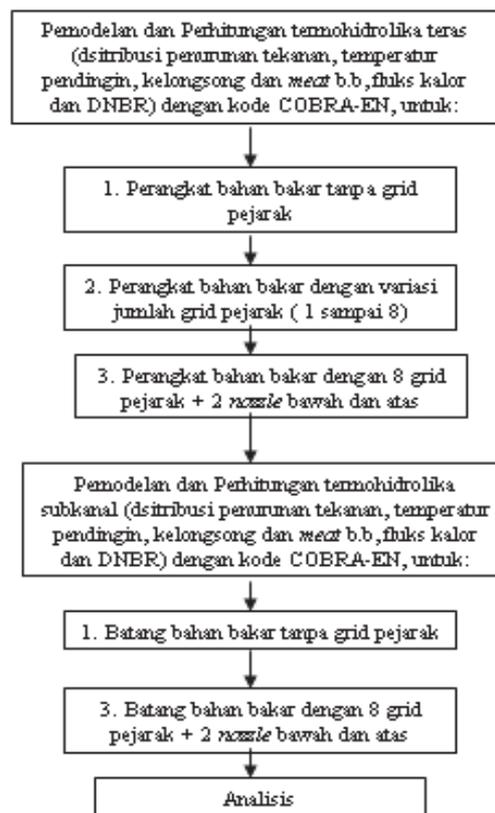
Di dalam melakukan analisis pengaruh grid pejarak ini digunakan data dari pembangkit listrik tenaga nuklir rancangan Westinghouse tipe AP1000, dengan data spesifikasi teknis tertera pada Tabel 1. Di dalam pengoperasian suatu PLTN, harus selalu dipastikan bahwa instalasi tersebut dapat beroperasi dengan selamat baik pada kondisi tunak (*steady-state*) maupun dalam kondisi transien. Pada reaktor PLTN PWR, batasan operasi reaktor dikatakan selamat jika temperatur meat bahan bakar pada kondisi terburuk sekitar 30% berada di bawah temperatur lelehnya 2594oC dan MDNBR lebih dari 2,80 dengan korelasi WRB-2M [1].

Tabel 1. Spesifikasi teknis AP1000 [1].

Tipe PLTN	AP1000
Daya termal (MW)	3400
Daya listrik terbangkit (MW)	1154
Laju alir efektif (kg/jam)	48,4437 x 10 ⁶
Tekanan operasi (MPa)	15,513
Temperatur <i>inlet</i> pendingin (°C)	279,44
Temperatur <i>outlet</i> pendingin (°C)	324,66
Penurunan tekanan teras (kPa)	275,0
Fluks kalor rerata (kW/m ²)	628,71
Fluks kalor maks (kW/m ²)	1634,71

METODOLOGI

Analisis pengaruh grid pejarak grid perangkat BBN pada perhitungan termohidrolika teras AP1000, sistematikanya ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Sistematika perhitungan termohidrolika teras dan subkanal adanya grid pejarak pada perangkat BBN AP1000.

Perhitungan di atas dilakukan untuk kondisi operasi tunak (*steady state*) meliputi kegiatan pemodelan, perhitungan, dan analisis hasil perhitungan, dan akan diperoleh hasil perhitungan untuk kanal (perangkat BBN) terpanas dan terdingin, serta subkanal (batang bahan bakar) terpanas sesuai desain.

Dalam pemodelan perhitungan dengan kode COBRA-EN, diambil 1/8 teras (26 perangkat) dari teras AP-1000 yang terdiri dari 157 perangkat BBN, dengan tiap perangkat dimodelkan menjadi satu kanal. Dalam analisis teras dipilih perangkat BBN posisi H-8 dengan faktor radial 1,279 sebagai kanal panas dan perangkat BBN posisi G-15 dengan faktor radial 0,436 sebagai kanal dingin, sedangkan untuk analisis titik terpanas (*the hottest spot*) dari subkanal terpanas digunakan faktor daya 2,60 sesuai dengan desain AP1000[1].

Perhitungan termohidrolika teras (kanal) dan subkanal diawali dengan perhitungan pada perangkat BBN tanpa grid pejarak, perangkat BBN dengan variasi jumlah grid pejarak dari 1 sampai 8, dan perangkat BBN dengan 8 grid pejarak dan 2 *nozzle* bagian bawah dan atas (untuk selanjutnya disingkat 8/2 *grid-nozzle*), sesuai batasan data masukan (*input*) kode COBRA-EN yang maksimum hanya 10 grid. Dari panjang perangkat BBN AP1000 4,267 m, dibuat distribusi faktor daya aksial sebanyak 61 node, dengan jarak spasi sebesar 0,0711 m/spasi, dan keluaran dibuat sebanyak 131 node di mana pada posisi grid pejarak dibuat 4 node dengan spasi 0,01 m dan 6 node dengan spasi 0,005 m. Dalam perhitungan digunakan data daya termal 3400 MW, laju alir efektif (*effective flow rate*) sebesar $48,4437 \times 10^6$ kg/jam atau setara dengan fluks massa pendingin awal 3468,2 kg/m².s dan temperature *inlet* pendingin 279,44°C sebagai data masukan. Posisi pemasangan grid pejarak dan *nozzle* untuk perhitungan ini ditunjukkan pada Tabel 2.

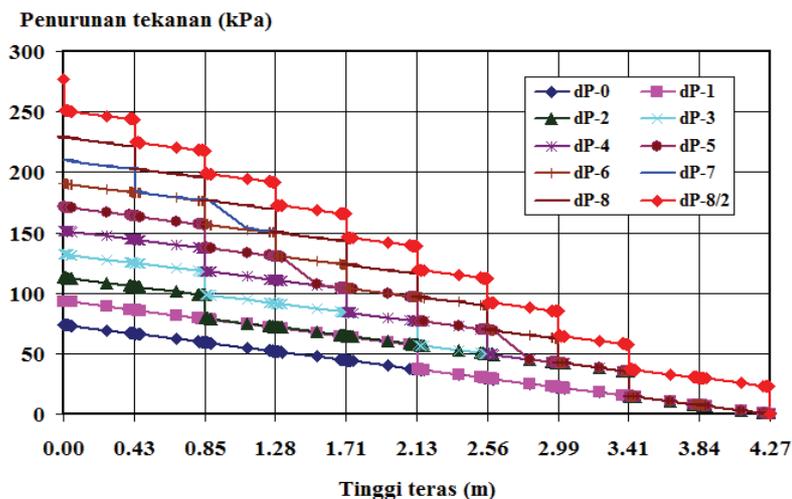
Tabel 2. Posisi pemasangan grid pejarak dan nozzle.

Jumlah grid	0	1	2	3	4	5	6	7	8	8/2
Nomor grid	x/L	x/L	x/L	x/L	x/L	x/L	x/L	x/L	x/L	x/L
										0.00
1		0.50	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.10	0.10	0.10
2			0.80	0.50	0.40	0.35	0.30	0.25	0.20	0.20
3				0.80	0.60	0.50	0.40	0.40	0.30	0.30
4					0.80	0.65	0.60	0.50	0.40	0.40
5						0.80	0.70	0.60	0.50	0.50
6							0.80	0.70	0.60	0.60
7								0.80	0.70	0.70
8									0.80	0.80
Nozzle atas										1.00

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengaruh Variasi Grid Pejarak Pada Perhitungan Termohidrolika Teras

Pengaruh variasi jumlah grid pejarak terhadap penurunan tekanan teras ditunjukkan pada Gambar 3. Sebagai dasar model perhitungan yakni pada model perangkat BBN tanpa grid, diperoleh penurunan tekanan teras sebesar 73,98 kPa.

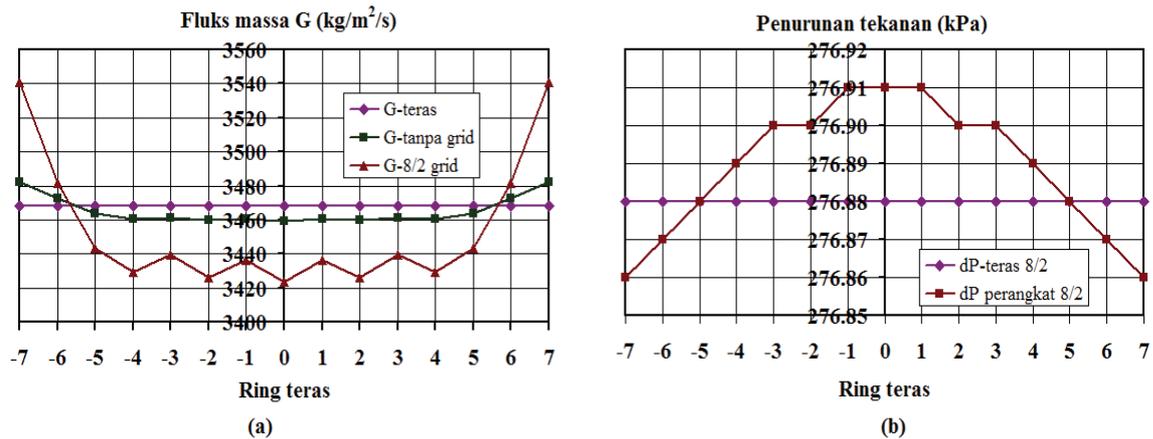


Gambar 3. Grafik distribusi penurunan tekanan teras sebagai fungsi tinggi teras aktif, untuk variasi jumlah grid pejarak.

Dari Gambar 3 terlihat bahwa setiap penambahan satu grid pejarak, akan berakibat bertambahnya nilai penurunan tekanan teras sekitar 19,4 kPa atau sekitar 26,22 %, sedemikian sehingga akibat penambahan 8 grid pejarak maka penurunan tekanan teras akan berubah dari 73,98 kPa menjadi 228,65 kPa (naik 154,67 kPa atau 209,07%). Pada perhitungan dengan penambahan nozzle bawah dan atas dibandingkan dengan model perangkat BBN dengan 8 grid, nilai penurunan tekanan sepanjang teras aktif akan berubah menjadi 276,88 kPa berarti naik 48,29 kPa atau 21,09 % yang berasal dari penambahan penurunan tekanan yang disebabkan oleh nozzle bawah sebesar 22,52 kPa (9,84 %) dan oleh nozzle atas sebesar 25,71 kPa (11,25 %). Hal ini disebabkan karena nozzle bawah dan atas sebagai pemegang perangkat BBN mempunyai bentuk lebih rapat dibanding grid pejarak bentuk lesung dengan sirip, sehingga akan memberikan pengaruh penurunan tekanan yang

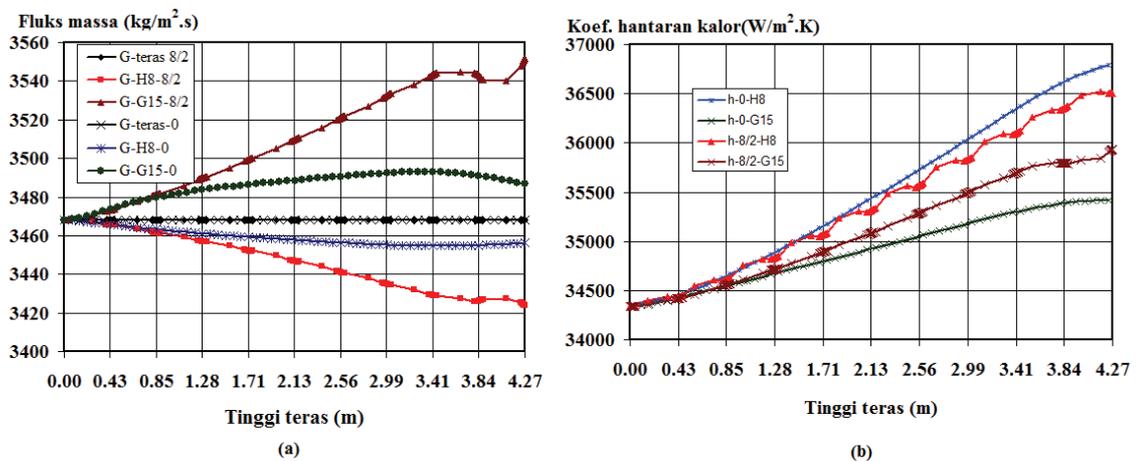
lebih besar. Adapun jika dibandingkan dengan penurunan tekanan sepanjang teras aktif desain AP1000 sebesar 275,0 kPa, maka hasil perhitungan dengan kode COBRA-EN sebesar 276,88 kPa ini terdapat perbedaan 0,68%. Hal ini menunjukkan bahwa pemodelan perangkat BBN dengan 8/2 grid-nozzle pada kode COBRA-EN cukup sesuai dengan model desain.

Dari perhitungan untuk variasi jumlah grid pejarak, diperoleh hasil nilai penurunan tekanan teras yang valid untuk model perangkat BBN dengan 8/2 grid-nozzle, maka dari itu, pada analisis selanjutnya hanya akan ditekankan pada perbandingan analisis termohidrolika pada perangkat BBN tanpa grid pejarak dan dengan 8/2 grid-nozzle, serta analisis pada subkanal terpanas dengan 8/2 grid-nozzle dari desain reaktor AP1000 yang beroperasi pada daya nominal kondisi tunak (*steady state*).



Gambar 4. Grafik distribusi arah radial teras (a). Fluks massa pendingin dan (b). Penurunan tekanan teras. Catatan: Ring 0 = posisi perangkat di tengah teras, Ring 7 = posisi di pinggir teras.

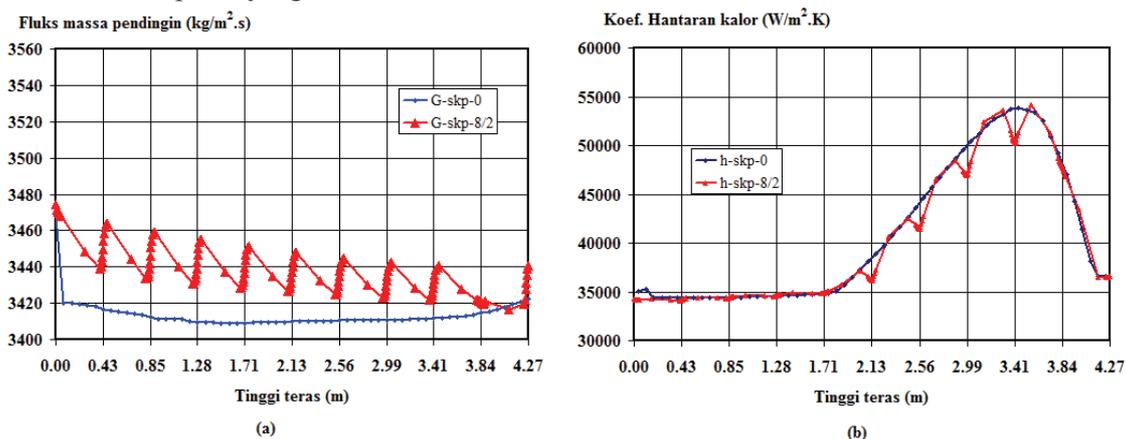
Gambar 4 menunjukkan grafik distribusi arah radial teras untuk (a). fluks massa pendingin dan (b). penurunan tekanan teras dari perangkat BBN posisi H8 di pusat teras (ring 0) sampai perangkat BBN posisi G15 di pinggir teras (ring 7). Dari Gambar 4(a) terlihat bahwa baik untuk fluks massa perangkat BBN tanpa grid maupun dengan 8/2 grid-nozzle pada bagian tengah teras (kanal panas) lebih rendah dibanding fluks massa pada pinggir teras (kanal dingin), yang menunjukkan adanya aliran arah lateral dari kanal panas ke kanal dingin, hal ini dikuatkan dengan bukti bahwa penurunan tekanan pada perangkat BBN di tengah teras lebih tinggi dibandingkan dengan yang di pinggir teras. Arah aliran lateral ini terjadi karena pada kanal panas membangkitkan panas yang lebih besar, yang menyebabkan temperatur pendingin pada kanal panas juga lebih tinggi dibanding pada kanal dingin di pinggir teras.



Gambar 5. Grafik distribusi arah aksial kanal panas dan kanal dingin (a). fluks massa pendingin dan (b). koefisien hantaran kalor. Catatan: 0 = perangkat BBN tanpa grid, 8/2 = perangkat BBN dengan 8/2 grid-nozzle.

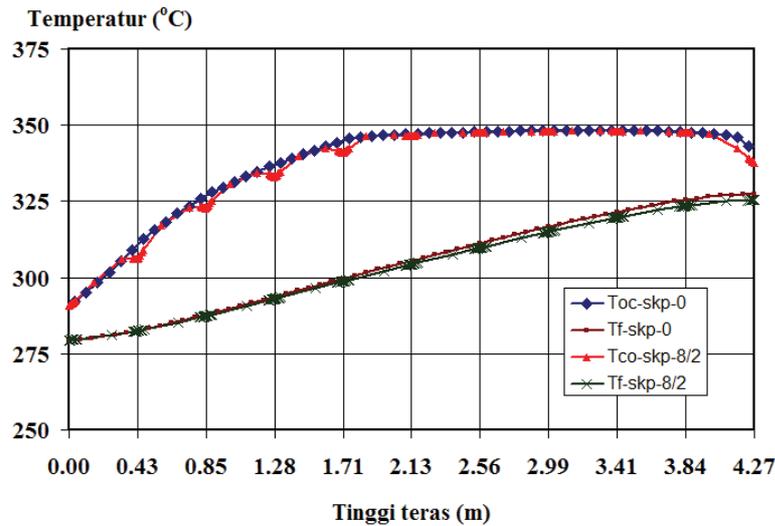
Pada Gambar 5 ditunjukkan besarnya fluks massa pendingin (G) dan koefisien hantaran kalor (h) sepanjang arah aksial perangkat BBN tanpa grid dan dengan 8/2 grid-nozzle, masing-masing untuk kanal panas dan kanal dingin. Sebagaimana Gambar 4, pada Gambar 5 (a) menunjukkan bahwa G dari kanal dingin lebih besar dibanding kanal panas. Dengan adanya pemasangan 8/2 grid-nozzle akan berakibat nilai G kanal panas menjadi semakin kecil (berkurang sampai 0,95%) sedangkan nilai G kanal dingin akan menjadi semakin besar (bertambah sampai 1,88%) akibat adanya aliran arah lateral dari kanal panas. Adapun Gambar 5 (b) menunjukkan grafik koefisien hantaran kalor (h) arah aksial. Pada perangkat BBN tanpa grid pejarak, nilai h untuk kanal panas lebih tinggi dari nilai untuk kanal dingin. Dengan adanya pemasangan 8/2 grid-nozzle akan berakibat nilai h dari kanal panas menjadi semakin kecil (berkurang sampai 0,79%) sedangkan pada kanal dingin akan menjadi semakin besar (bertambah sampai 1,45%).

Dari analisis kanal di atas, belum terlihat secara jelas pengaruh pemasangan 8/2 grid-nozzle kecuali perubahan nilai G yang lebih kecil pada kanal panas dan lebih besar pada kanal dingin, dan berlaku sebaliknya pada nilai h . Di bawah ini, akan dibahas analisis subkanal terpanas (SKP) yaitu rod bahan bakar terpanas yang memiliki faktor radial 2,60 untuk mencari batasan desain.



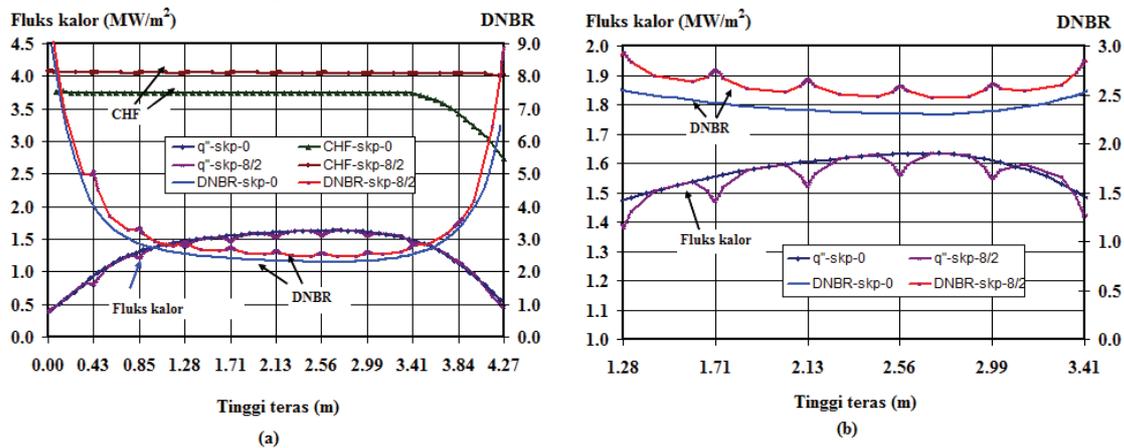
Gambar 6. Grafik distribusi arah aksial subkanal terpanas (SKP) (a). fluks massa pendingin dan (b). koefisien hantaran kalor. Catatan: 0 = SKP tanpa grid, 8/2 = SKP dengan 8/2 grid-nozzle.

Pada Gambar 6 ditunjukkan besarnya fluks massa pendingin (G) dan koefisien hantaran kalor (h) sepanjang arah aksial subkanal terpanas (SKP) tanpa grid dan SKP dengan 8/2 grid-nozzle. Pada Gambar 6 (a) terlihat adanya puncak berbentuk gerigi pada kurva G dari SKP dengan 8/2 grid-nozzle. Dibanding SKP tanpa grid yang memiliki nilai G rerata sebesar $3413,54 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$, maka nilai G rerata dari SKP dengan 8/2 grid-nozzle sebesar $3438,26 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$ lebih besar 0,72%, dengan perbedaan maksimum 1,91% pada puncak gerigi. Dengan dipasangnya grid pejarak akan membuat turbulensi aliran meningkat sebelum melalui grid (fluks massa bertambah sampai 1,69%) dan berkurang lagi setelah melewati grid karena hambatan dari grid pejarak. Adanya fluktuasi G berakibat nilai h juga terjadi fluktuasi, seperti ditunjukkan pada Gambar 6 (b). Dibanding pada SKP tanpa grid (h rerata = $40.806,4 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$), maka nilai h rerata dari SKP dengan 8/2 grid-nozzle sebesar $39.902,8 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ berarti 2,21%, dan pada puncak gerigi lebih rendah 4,06%.



Gambar 7. Grafik distribusi temperatur pendingin dan temperatur kelongsong luar dari SKP tanpa grid pejarak dan SKP dengan 8/2 grid-nozzle. Catatan: f = fluida (pendingin), oc = outer cladding (kelongsong luar).

Gambar 7 menunjukkan grafik distribusi temperatur pendingin dan kelongsong luar dari SKP tanpa grid pejarak dan SKP dengan 8/2 grid-nozzle. Dengan pemasangan 8/2 grid-nozzle menyebabkan temperatur kelongsong berkurang 0,15 sampai 1,57% dan temperatur pendingin berkurang 0,0% (pada masukan) sampai 0,66% (pada keluaran subkanal). Meskipun temperatur kelongsong dan pendingin berkurang, tetapi beda temperatur kelongsong dan pendingin ($\Delta T = T_c - T_f$) pada umumnya lebih kecil 5,50 sampai 20,65% tetapi ada beberapa titik di posisi grid yang memiliki ΔT lebih besar 3,15 sampai 7,93%. Hal ini antara lain dipengaruhi oleh nilai h dan nilai fluks kalor (q'') yang berbeda terutama pada posisi terpasangnya grid pejarak.



Gambar 8. Grafik distribusi fluks kalor, fluks kalor kritis (*critical heat flux – CHF*) dan DNBR pada analisis SKP AP1000. (a) untuk sepanjang kanal, (b) zoom untuk fluks kalor dan DNBR. (Catatan: 0 = SKP tanpa grid pejarak, 8/2 : SKP dengan 8/2 grid -nozzle).

Gambar 8 menunjukkan grafik distribusi fluks kalor, fluks kalor kritis dan DNBR pada analisis SKP AP1000. Akibat dari pemasangan 8/2 grid-nozzle akan mengakibatkan penurunan tekanan sepanjang teras aktif menjadi lebih besar, hal ini akan menyebabkan fluks kalor kritis pada SKP dengan 8/2 grid-nozzle (sebesar 4.015,9 kW/m²) meningkat rata-rata 11,20% dibandingkan fluks kalor kritis pada subkanal panas tanpa grid pejarak sebesar 3.611,5 kW/m² (berdasarkan persamaan 2).

Karena digunakan daya reaktor yang sama (tidak berubah), maka fluks kalor yang dibangkitkan oleh subkanal panas juga tidak berubah, kecuali pada posisi grid pejarak maka fluks kalor SKP dengan 8/2 grid-nozzle lebih rendah antara 3,92% sampai 15,63%. Berdasarkan persamaan 6, maka nilai DNBR sepanjang tinggi kanal untuk SKP tanpa grid diperoleh antara 2,30 sampai 8,95, sedangkan untuk SKP dengan 8/2 grid-nozzle diperoleh sebesar 2,48 sampai 10,53 (meningkat 7,62% sampai 17,64%).

Berdasarkan analisis dari Gambar 4 sampai 8, maka secara garis besar perbandingan hasil perhitungan termohidrolika kanal panas, kanal dingin dan subkanal terpanas pada reaktor AP1000 pada operasi daya nominal kondisi tunak (*steady state*) untuk model tanpa grid pejarak dan dengan 8/2 grid-nozzle menggunakan kode COBRA-EN dapat dirangkum menjadi Tabel 3. Dari Tabel 3 menunjukkan bahwa akibat pemasangan 8/2 grid-nozzle akan mengakibatkan penurunan tekanan teras semakin besar 3,74 kali, G rerata pada kanal panas berkurang 1,03%, G rerata kanal dingin dan subkanal terpanas bertambah masing-masing 1,91% dan 0,25%, temperatur pendingin keluaran sebesar 0,02% sampai 0,66%, temperatur kelongsong luar bertambah 0,00 sampai 0,18% dan temperatur *meat* bahan bakar bertambah 0,02 sampai 0,04% dibanding nilai yang sama pada perangkat BBN tanpa grid pejarak. Namun demikian, jumlah grid pejarak juga harus dibatasi tidak boleh menutup keseluruhan perangkat, karena grid pejarak yang semakin banyak justru akan membentuk selubung perangkat BBN yang akan menghalangi aliran silang (*cross flow*) antar perangkat BBN, sehingga akan berakibat semakin tingginya temperatur pendingin sehingga dapat mencapai temperatur saturasi dan terjadi pendidihan sebagaimana terjadi pada perangkat BBN reaktor air tekan (*Boiling Water Reactor – BWR*).

Tabel 3. Perbandingan hasil perhitungan termohidrolika kanal panas, subkanal panas dan titik terpanas reaktor AP1000 pada operasi daya nominal kondisi tunak (*steady state*) menggunakan kode COBRA-EN

	Perangkat b.b tanpa grid pejarak			Perangkat b.b. dengan 8 grid pejarak+ 2 nozzle atas dan bawah					
	Kanal panas	Kanal dingin	Subkanal terpanas	Kanal panas		Kanal dingin		Subkanal terpanas	
	Nilai	Nilai	Nilai	Nilai	Dev. (%)	Nilai	Dev. %	Nilai	Dev. (%)
Faktor radial	1,279	0,436	2,60	1,279	0,00	0,436	0,00	2,60	0,00
Pressure drop sepanjang teras aktif (kPa)	74,01	73,96	73,99	276,91	N.A	276,86	N.A	276,88	N.A
Fluks massa rerata (kg/m ² .s)	3459,11	3485,56	3422,32	3423,65	-1,03	3552,01	1,91	3430,79	0,25
Koefisien hantaran kalor rerata (W/m ² .K)	35.489	34.917	40.806	35.363	-0,35	35.107	0,55	39.903	-2,21
Temperatur T (°C)									
T tengah <i>meat</i> maks	944,75	507,65	1593,95	945,15	0,04	500,75	0,02	1594,25	0,02
T <i>meat</i> bag. luar, maks	449,85	339,25	585,55	450,35	0,11	339,55	0,09	585,55	0,00
T <i>clad</i> bag. dalam, maks	361,55	309,55	400,55	361,85	0,08	309,55	0,00	400,45	-0,02
T <i>clad</i> bag. luar, maks	337,55	301,75	348,35	338,15	0,18	301,75	0,00	348,35	0,00
T pendingin keluaran	323,06	297,21	327,51	322,85	-0,07	297,15	-0,02	325,34	-0,66
Fluks kalor kritis (kW/m ²)	3452,2	3460,8	3661,8	3707,8	7,40	3744,1	8,19	4046,6	10,51
Fluks kalor maks (kW/m ²)	803,92	274,05	1634,51	804,37	0,06	274,20	0,05	1635,16	0,04
DNBR min atau MDNBR	4,33	12,73	2,30	6,97	61,0	13,79	8,31	2,48	7,62

Jika dibandingkan hasil perhitungan untuk titik terpanas dengan 8 grid pejarak dan 2 nozzle atas dan bawah (Tabel 3) dengan data desain (Tabel 1) diperoleh hasil temperatur *outlet* pendingin sebesar 325,34°C (perbedaan 0,21%), penurunan tekanan teras sebesar 276,88 kPa (perbedaan 0,68%), fluks kalor maksimum sebesar 1635,16 kW/m² (perbedaan 0,03%) dan DNBR minimum sebesar 2,48 (korelasi W-3) lebih kecil 11,61% dibanding data desain (korelasi WRB-2M), dan lebih besar 14,06% dibanding persyaratan dengan korelasi W-3.

KESIMPULAN

Dari perbandingan analisis termohidrolika kanal panas, kanal dingin dan subkanal terpanas desain reaktor AP1000 pada operasi daya nominal kondisi tunak (*steady state*) untuk model perangkat BBN tanpa grid pejarak dan model perangkat BBN dengan 8/2 grid-*nozzle* menggunakan kode COBRA-EN menunjukkan bahwa akibat pemasangan 8/2 grid-*nozzle* akan mengakibatkan penurunan tekanan teras semakin besar, sedangkan fluks massa pendingin dan koefisien hantaran kalor terjadi berfluktuasi pada daerah grid pejarak. Penurunan tekanan semakin besar juga akan berakibat pada nilai fluks kalor kritis bertambah besar. Karena fluks kalor cenderung tidak berubah (tidak ada perubahan daya reaktor), kecuali pada sekitar grid pejarak maka akan menyebabkan nilai DNBR bertambah besar yang berarti margin keselamatannya bertambah besar.

Perhitungan untuk subkanal terpanas desain dengan 8/2 grid-*nozzle* menunjukkan perbedaan yang tidak signifikan pada temperatur *outlet* pendingin, penurunan tekanan teras, dan fluks kalor maksimum, serta diperoleh MDNBR minimum sebesar 2,48 lebih besar 14,06% dibanding persyaratan korelasi W-3 sebesar 2,17. Dibanding perangkat BBN tanpa grid, maka adanya penambahan 8/2 grid-*nozzle* akan memberikan nilai parameter termohidrolika dan angka keselamatan yang lebih baik.

DAFTAR PUSTAKA

1. AP1000 European Design Control Document, EPS-GW-GL-700 Revision 1: Westinghouse; 2009. Chapter 4 Reactor, p. 4.2.14-46. Available from : http://www.ukap1000application.com/doc_pdf_library.aspx. Accessed March 8, 2010.
2. Song K.N., Lee S.B., Lee S.H. Performance Evaluation of New Spacer Grid Shapes for PWRs. *Journal of Nuclear Engineering and Technology*. 2007; 39(6): 737-746.
3. Darwis Isnaini M. Pemetaan distribusi suhu dan DNBR pada perangkat bahan bakar AP1000-EU. *Jurnal Teknologi Reaktor Tri Dasa Mega*. 2010; 12(2):103-113.
4. Darwis Isnaini M., Dibyo S., Suroso, Geni RS., Endiah PH., Subekti M. Evaluasi Parameter Desain Termohidrolika Teras dan Subkanal PLTN AP1000 pada Kondisi Tunak. *Jurnal Teknologi Reaktor Tri Dasa Mega*. 2012; 14 (1): 14-28.
5. Filho FAB., Caldeira AD., Borges EM. A problem in the COBRA-EN code related to the void fraction calculation. *Annals of Nuclear Energy*. 2005; 32:1782-1785.
6. Todreas N., Kazimi MS. *Nuclear Systems I: Thermal Hydraulic Fundamentals*. USA: Hemisphere Publishing Corporation; 1990; p.386-388, 558-560.
7. Sugimoto J., Muraov Y. Effect of grid spacers on reflood heat transfer in PWR-LOCA. *Journal of Nuclear and Science*. 1984: 103-114. Available from: URL: <http://www.tandfonline.com/loi/tnst20>, Version of record first published: 15 Mar 2012. Accessed December 05, 2012.
8. Min Tsung K., Chung Y.W., Ching C.C., Xu Y., Yuan K., Dzodzo M., Conner M., Beltz S., Ray S., Bissett T. CFD analysis of PWR core top and reactor vessel upper plenum internal subdomain models. *Journal Nuclear Engineering and Design*. 2011; 241: 4181-4193.
9. Shuffler C., Trant J., Malen J., Todreas N. Thermal hydraulic analysis for grid supported pressurized water reactor cores. *Journal Nuclear Engineering and Design*. 2009; 239: 1442-1460.
10. Diller P., Todreas N., Hejzlar P. Thermal-hydraulic analysis for wire-wrapped PWR cores. *Journal Nuclear Engineering and Design*. 2009; 239: 1461-1470.